

디지털 전환 기법을 적용한 노후 원전 해체재고량 산정 방법

김유수*, 이해연**

Decommissioning Waste Inventory Estimation Method of Aging Nuclear Power Plants through Digital Transformation Techniques

You-Soo Kim*, Hae-Yeoun Lee**

요약

노후 원전인 고리1호기는 영구정지되어 원자력안전법 적용 대상에서 배제하기 위한 해체 인허가 심사 중이다. 영구정지된 원전의 최종해체계획서에는 해체 대상인 구조물, 계통 및 기기에 존재하는 방사선학적 특징, 해체 방법과 일정, 안전성 평가, 방사선방호, 제염 해체 활동 등의 구체적 계획을 포함하여, 해체 대상의 물량을 제시해야 한다. 본 논문에서는 디지털 자료가 부족한 노후 원전인 고리1호기 해체재고량의 오차를 최소화할 수 있는 디지털 전환 방법인 도면 기반 3차원 역설계의 효과성을 연구하였다. 기존 2차원 도서에 기반한 전통적인 방식에 대비하여 디지털 전환 방식에 따른 해체재고량의 정확도는 84.5~130.3%로 나타났고, 해체재고량 오차는 2% 이내로 그 유효성이 입증되었다.

Abstract

Aging a nuclear power plant, Kori Unit 1, has been permanently shut down and undergoing Final Decommissioning Plan approval review to be discharged from the application of the Nuclear Safety Act. The Final Decommissioning Plan must include specific plans and the decommissioning waste inventory for structures, systems, and components to be dismantled, including radiation characteristics, dismantling methods, schedule, safety evaluation, radiation protection, and decontamination/dismantling activities. In order to enable aging nuclear power plants without digital data to meet the requirements of the decommissioning plans for nuclear reactor facilities and review guides, this paper scrutinized 3D-based reverse engineering method based on printed drawings that can minimize errors in the decommissioning waste inventory. Compared to the conventional 2D drawing-based method, the accuracy of proposed digital transformation method was 84.5~130.3% and the inventory error rate was within in 2%, proving its effectiveness.

Keywords

final decommissioning plan, FDP, digital transformation, DX, decommissioning waste inventory, 3D reverse engineering

* 국립금오공과대학교 디지털융합공학과 박사과정, 한국전력기술(주) 사업부책임자

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9828-4520>

** 국립금오공과대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 교수 (교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6081-1492>

· Received: Jul. 01, 2024, Revised: Aug. 01, 2024, Accepted: Aug. 04, 2024

· Corresponding Author: Hae-Yeoun Lee

Dept. of Digital Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

Tel.: +82-54-458-7548, Email: haeyeoun.lee@kumoh.ac.kr

1. 서 론

현재 한국에는 총 32기의 원자력발전소(원전)가 있다. 영구정지된 고리1호기와 월성1호기를 포함하여 총 12기의 원전은 2030년 이전에 설계수명에 도달한다. 원전 해체·철거공사를 착수하기 위해서는 원자력안전위원회의 최종해체계획서(FDP, Final Decommissioning Plan) 승인이 필요하다. 최종해체계획서는 원자력안전법과 원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정에 따라 해체계획의 개요, 사업관리, 부지 및 환경 현황, 해체 전략과 방법, 해체 용이성을 위한 설계특성과 조치방안, 안전성 평가, 방사선방호, 제염 해체 활동, 방사성 폐기물관리, 환경영향평가, 화재 방호, 기타, 참고문헌으로 구분하여 제1장부터 제13장까지 작성하여야 한다[1].

최종해체계획서에는 방사능에 오염된 해체 대상 구조물·계통 및 기기(SSCs: Structures, Systems, and Components)를 식별하고 이에 대한 필수 입력자료인 해체재고량(DWI, Decommissioning Waste Inventory)을 제시하여야 한다. 이후 방사선학적 특성 및 구조물·계통 및 기기의 제염 및 해체 방법, 방사성폐기물의 발생 및 특성 등의 세부 항목을 작성하여야 한다.

하지만 고리1호기를 포함한 12호기의 노후 원전은 설계, 건설, 운영, 유지보수를 위한 자료의 전산화 비율이 높지 않다. 전산화 적용과 연계하여 제조업 분야의 단종 부품 생산 및 특수 형상 복원 등에서 활용하고 있는 역설계 적용 사례를 파악하였다[2]. 본 논문에서는 국내 최초로 영구정지한 원전인 고리1호기 최종해체계획서 작성 과정에서 확보한 문제점의 원인을 분석하고 그 문제점을 해결하는 새로운 방안으로 3차원 역설계(3D reverse engineering)를 통한 디지털 전환(DX, Digital Transformation) 방법을 제안하고 그 효과성에 대한 연구를 수행하였다.

원전은 건설산업임과 동시에 원자력산업에 속하는 특수한 업종이다. 원자력 업계는 건설업 기반의 정부 규제기반 산업으로 정보산업 및 제조업계 대비 디지털 적용 수준이 현저하게 낮은 것이 현실이다[3]. 원자력 산업계는 방사성 재해 사고의 가능성을 배제하고자 완전하게 입증된 기술(Proven technology)만 적용하여 설계를 수행해오고 있다. 원자로 시설

등의 기술기준에 관한 규칙에 따라 원전의 해체 시에도 같은 기준이 적용된다. 만일, 새로운 해체 방법을 적용하고자 하면 타당한 근거를 제시하고 그 안전성을 최종해체계획서 신청자가 입증하여야 한다[4]. 상술한 원인으로 인하여 원전 산업계에서는 그 유효성이 입증된 전통적인 2차원 기반의 설계 방식을 주로 적용하고 있다. 이러한 배경이 원전 산업계의 디지털 전환 도입의 걸림돌이 되고 있다.

노후 원전의 디지털 정보 부족의 문제점을 해결하기 위하여 새로운 기법의 적용이 필요하다. 본 논문에서 제안하는 3차원 역설계를 통한 디지털 전환 기법을 적용한 해체재고량 평가는 해체 설계의 근본적인 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 원전 구조물, 계통 및 기기는 물리적 위치가 아닌 기능별 위치 기준으로 관리 번호를 부여하여 관리하는 분류 체계로 인하여 전통적인 방식으로 작성한 해체재고량의 개선이 필요하다. 본 논문에서 제안한 방법을 통하여 원전의 해체계획 수립 시 해체재고량의 정확도를 향상함과 동시에 불확실성에 대한 지나친 보수성을 배제할 수 있다.

본 논문의 기여도는 다음과 같다. 첫째, 국내 최초 영구정지된 원전의 최종해체계획서 작성에 디지털 전환 기반의 방법을 적용하여 해체재고량 산정의 정확도를 향상하였다. 둘째, 벌크성(배관 및 케이블트레이 등) 기자재에 물량 산정의 효율성을 높이기 위하여 3차원 기반의 새로운 방식을 도입하였다. 셋째, 디지털 전환 기반의 해체재고량 평가 과정에서 구축한 3차원 자료는 향후 원전 철거 작업자 사전 교육 자료 및 해체수행절차서 작성의 기초 자료로 활용할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 관련 연구로 디지털 전환 기반의 해체재고량 평가의 대내외 필요성과 중요성에 대하여 논하고 디지털 전환 방식의 대표적 기법인 2차원 기반 도면을 활용한 역설계 방법에 대해 기술한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 3차원 역설계 방법 및 수행 절차에 대해 자세하게 설명한다. 4장에서는 2차원 도면 및 도서를 활용한 평가 기법과 디지털 전환 기반으로 작성한 해체재고량 평가에 대해 논하고, 마지막으로 5장에서는 결론을 기술하고 본 연구가 갖는 한계점 및 향후 연구를 제안한다.

II. 관련 연구

2.1 전통적인 방식에 기반한 해체재고량 평가

원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정 제8장에 따르면 해체 대상 구조물·계통 및 기기의 해체재고량을 제시하여야 하며 해체물량은 해체계획서 작성의 필수 입력 요소이다[5]. 그림 1은 2차원 도서에 기반한 최종해체계획서 작성의 흐름도를 보여준다.

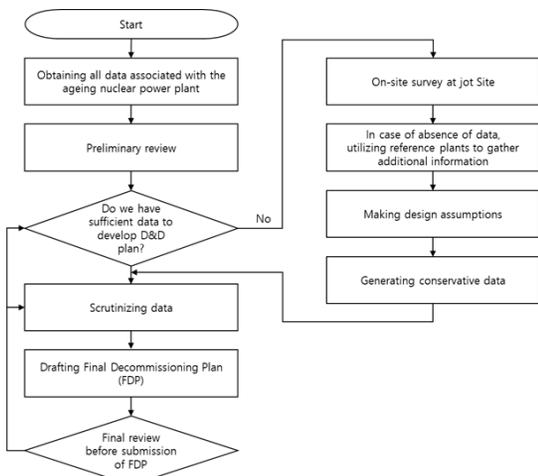


그림 1. 2차원 도서 기반 최종해체계획서 작성 흐름도
Fig. 1. Flow chart for writing FDP based on 2D-based documents and drawings

1978년 준공한 고리1호기의 경우에 해체재고량 산정을 위해 필요한 각종 도면, 도서, 규격서, 절차서 등의 다양한 정보를 확보하는 데 많은 장애요인이 있다. 상당수의 도면은 전산화되어 있지 않고, 수기 또는 등사기로 출력된 도면 및 도서는 그림 2와 같이 품질이 불량하다.

전통 방식에 기반한 물량평가 절차는 그림 3과 같다. 그림 3(a)는 노후 원전에서 확보하여 2차원 전산화 도면화 작업을 수행한 배관계장도에 철거대상인 20인치 배관을 색상으로 식별하는 과정을 나타낸다. 그림 3(b)는 배관계장도에 식별한 20인치 해당 배관을 배관등각투상도에 동일 색깔로 표기하는 과정이다. 그림 3(c)는 배관등각투상도에 표기한 해당 배관의 길이를 하나씩 구분하여 수기로 정리하는 과정을 보여준다.

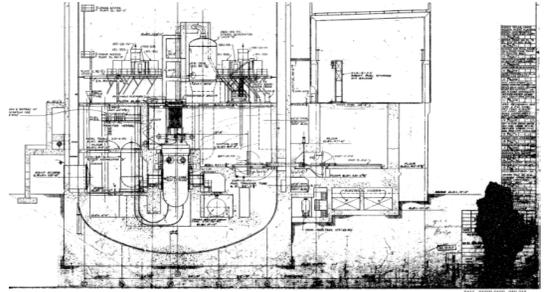
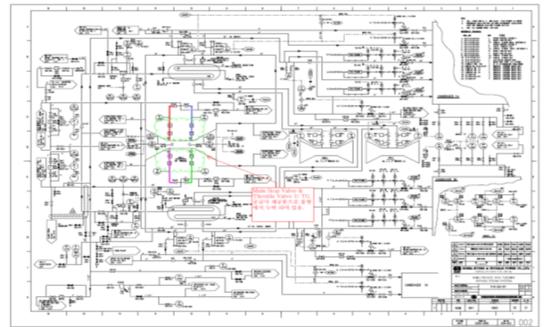
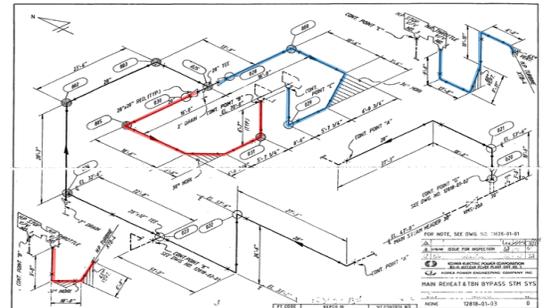


그림 2. 가독성이 불량한 도면 예시
Fig. 2. Example of a poorly illegible drawing



(a) 철거대상 선정 및 식별 (배관계장도)

(a) Selection and identification of dismantling items (P&IDs)



(b) 철거대상 선정 및 식별 (배관등각투상도)

(b) Selection and identification of dismantling items (Isometric drawings)

A1: 28" Tee to HP Stop Valve No.1 (붉은색 배관).

$$\begin{aligned}
 A1 &\approx (16.0''+10.6''+\text{Root}(3.6''^2+6(3/4)''^2)+5.7(1/4)''+6.7'') + (9'8''+18'0''+6'8'') \\
 &\approx (4.8768+3.2004+2.1337+1.7082+2.0066) + (2.9464+5.4864+2.0320) \text{ m} \\
 &\approx (13.9257 + 10.4648) \text{ m} \approx 24.39 \text{ m} (\approx 80.02 \text{ ft}).
 \end{aligned}$$

B1: 28" Tee to HP Stop Valve No.3 (파란색 배관).

$$\begin{aligned}
 B1 &\approx (16.0''+10.6''+\text{Root}(3.6''^2+6(3/4)''^2)+5.7(1/4)''+6.7'') + (9'8''+13'8''+9'11''+10'10''+6'0'') \\
 &\approx (4.8768+3.2004+2.1337+1.7082+2.0066) + (2.9464+4.1656+5.4864+3.3020+1.8288) \text{ m} \\
 &\approx (13.9257 + 17.7292) \text{ m} \approx 31.65 \text{ m} (\approx 103.8488 \text{ ft}).
 \end{aligned}$$

(c) 철거대상 배관 길이 산정

(c) Calculation of the length of pipe to be dismantled

그림 3. 전통적인 방식에 의한 예비물량표 산정 절차
Fig. 3. Process for calculating pipe length based on conventional method

2.2 디지털 전환 방식의 도입 필요성(내부)

전통적인 방식을 적용하여 산정한 예비물량의 정합성을 확인하기 위하여 전문가를 통한 제삼자 검증을 시행하였다. 검증 대상으로는 고리1호기 주증기계통(Main steam system)의 배관을 선정하였다. 선정 사유는 해당 계통의 자료 확보율이 높았으며 미확보 자료는 현장 실사를 통한 대구경 배관의 철거물량 파악이 가능하였기 때문이다. 주증기계통의 배관 예비물량 대비 제삼자 검증을 통한 오차율은 84.5%에서 130.3% 범위에 있었다. 이 밖의 특이사항으로는 누락 된 배관과 배관 지름의 표기 오류도 발견하였다. 전통적인 방식을 통한 물량 평가의 한계를 파악할 수 있었다. 자세한 수치는 표 1에 정리하였다.

표 1. 예비물량표 발생 오차 비교
Table 1. Comparison of errors in preliminary quantities

System / Pipe diameter	Data	Conventional (ft)	3 rd party validation (ft)	Ratio rate (%)
Main steam/28 inches (MS-PI-1)		97.7	97.7	100.0
Main steam/28 inches (MS-PI-2)		110.7	110.7	100.0
Main steam/28 inches (MS-PI-3)		239.2	262.5	109.7
Main steam/28 inches (MS-PI-4)		68.8	89.7	130.3
Main steam/28 inches (MS-PI-11/12/16/17/18)		531.8	514.9	96.8
Main steam/20 inches (MS-PI-13/14/15)		175.8	183.9	104.6
Main steam/20 inches (MS-PI-19/20/21)		175.8	183.9	104.6
Main steam/20 inches (N/A)		0	34.2	omission
Main steam/4 inches (MS-PI-37)		27.6	27.6	100.0
Main steam/6 inches (MS-PI-38)		105.7	111.2	105.2
Main steam/6 inches (MS-PI-45)		122.9	122.9	100.0
Main steam/6 inches (MS-PI-46) (Dia. error)		67.9	57.4	84.5
Main steam/4 inches (MS-PI-128A/B)		0	11.2	omission

전통적인 방법으로 해체재고량을 파악하는 것은 매우 노동집약적인 방식이며 동시에 물량 산정시 활용하는 2차원 도면, 도서, 규격서의 명기된 자체 오류를 찾아내는 것은 원천적으로 불가능하다. 또한 작업자 업무 경험도, 계통에 대한 이해 수준, 도면 해석 능력 등에 따른 물량평가의 차이가 발생할 수 있다. 또한 산정 결과를 전산 자료로 입력하는 단계에서 단순한 전산 입력 오류 등도 배제할 수 없다.

상기 사유로 발생 가능한 오류를 보완하기 위해서 통상적인 물량 산정보다 더 높은 설계 여유율을 적용하였다. 전통적인 방식의 한계에 기반한 보완책은 해체재고량의 보수적인 평가라는 인허가 심사지침에는 부합하는 내용이나 반대급부로 해체재고량의 물량을 증가시키는 요인이 될 수 있다.

2.3 디지털 전환 방식의 도입 필요성(외부)

건설 현장 자료 수집의 자동화를 위한 3D-스캐너 등의 도구를 활용하여 현장 자료를 디지털 건설정보로 변환하는 노력을 진행하고 있지만, 현재까지 연구단계에 머물러 있다[6]. 국토교통부는 2025년부터 건설산업에 건설정보모델링(BIM, Building Information Modeling) 설계 적용을 목표로 BIM 관련 정책 및 연구 개발 등을 적극추진 중이다. BIM 활성화 목적으로 2020년 12월 건설산업 BIM 기본지침을 마련하였으며, 해당 지침의 기본체계, 구성 및 위계는 그림 4에 나타내었다[7]. 건설산업 BIM 기본지침에 따르면 BIM은 시설물의 생애주기 동안 발생하는 모든 정보를 3차원 모델 기반으로 통합하여 건설 정보와 절차를 표준화된 방식으로 상호 연계하고 디지털 협업이 가능해지게 하는 디지털 전환 체계를 의미한다.



그림 4. BIM 기본 및 하위 지침의 위계
Fig. 4. Hierarchy of BIM basic and sub-guides

원전 해체는 대통령 직속 독립조직인 원자력안전위원회의 관리와 감독 아래에 있으므로 국토교통부의 지침의 강행 여부는 유권해석의 논란이 있을 수 있으나, 건설산업기본법 제2조(정의)에 따라 기계설비나 그 밖의 구조물의 설치 및 해체공사 등도 건설공사로 정의하고 있다. 그에 따라 원전 해체·철거공사의 추정가격이 300억 원 이상일 경우에는 철거공사와 연계한 설계·발주·조달·시공 등의 역무가 BIM 적용 의무화 대상이 될 수 있음을 간과해서는 안 된다[7].

대한민국 정부의 디지털 확대 정책과 건설산업의 디지털 역량 강화라는 시대적 흐름에 따라 원전 해체공사에도 BIM을 적용해야 한다는 산·학·연구계의 움직임이 있다. 건설산업 BIM 기본지침에 따라 설계 자료 전산화의 중요성이 계속 증가할 것이라는 명제는 누구도 부인할 수 없다. 원전 산업계의 특수성을 감안하더라도 원전의 해체공사도 시대를 역행할 수는 없기에 기존 인쇄 자료의 디지털 전환 및 최종해체계획서 승인 이후 작성하는 공사 설계서도 디지털 자료 기반으로 작성해야 한다는 대외적인 요구가 더욱 강화될 것으로 예상된다.

2.4 2차원에 기반한 디지털 전환 작업

철거대상 중에서 기기 번호(Equipment tag no.)가 존재하는 기능위치 기반의 기자재의 오차는 크지 않았다. 기기에 대한 디지털 전환의 범위는 해당 기기의 크기와 수량으로 한정하였다. 하지만 기기 번호가 없는 벌크성 자재의 경우는 해체재고량의 오차가 상당수 발견되었다. 디지털 전환 방식의 일환으로 상용 소프트웨어인 오토캐드를 사용하여 2차원 전산 도면을 생성하였다. 도면 또는 사진을 스캔하여 데이터 처리 플랫폼을 거치는 디지털 전환 기법은 도면의 품질 문제로 적용하지 못하였다. 확보한 도면 또는 사진은 비축척(Non-scale) 자료로 스캔에 의한 디지털 전환 방식은 적용하지 않았다. 도면 또는 사진의 스캔 자료는 오토캐드의 배경 도면으로만 활용하는 객체연결삽입(Object linking and embedding)과 외부참조(External references) 기능을 활용하였다. 스캔 자료를 통하여 실제 수치를 추출

하지 않고 설계자가 직접 수치를 입력하여 디지털 전환 환경에서 사용할 수 있는 전산화 된 기초 자료를 작성하는 방식을 적용하였다. 2차원 도서에 기반한 역설계 흐름은 그림 5에 나타내었다.

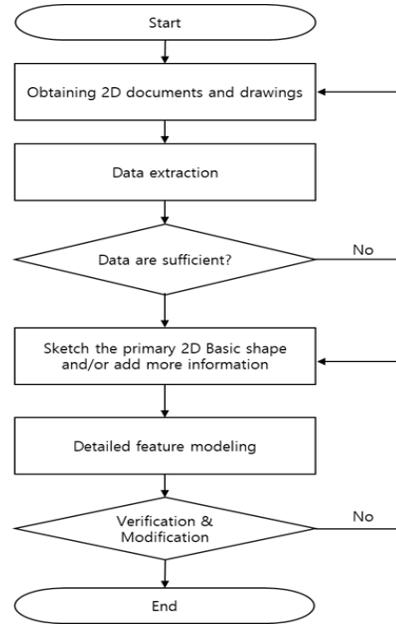


그림 5. 2차원 도서 기반 역설계 흐름도

Fig. 5. Flow chart for reverse engineering based on 2D-based documents and drawings

III. 제안하는 3차원 역설계 기반 디지털 전환 기법을 통한 노후 원전 해체재고량 산정 방법

3.1 구조물 및 기기의 3차원 역설계

해체 원전에서 가장 큰 부피를 차지하는 구조물의 디지털 전환 작업을 우선 수행하였다. 전산화 작업을 완료한 2차원의 부지배치도(Site plot plan)를 사용하여 3차원 시각화 부지배치도를 생성하였다. 그림 6에는 보조건물 및 터빈건물에 대한 3차원 시각화 부지배치도를 도시하였다.

후속 업무로 각 건물의 일반기기배치도(General arrangement drawings)에 근거한 계통별 주요기기와 내력벽, 전단벽, 계단 등의 구조물을 바닥 면 기준으로 3차원으로 시각화하였다. 그림 7은 보조 건물 내부의 3차원 일반기기배치도 작성 예시를 표기하였다.

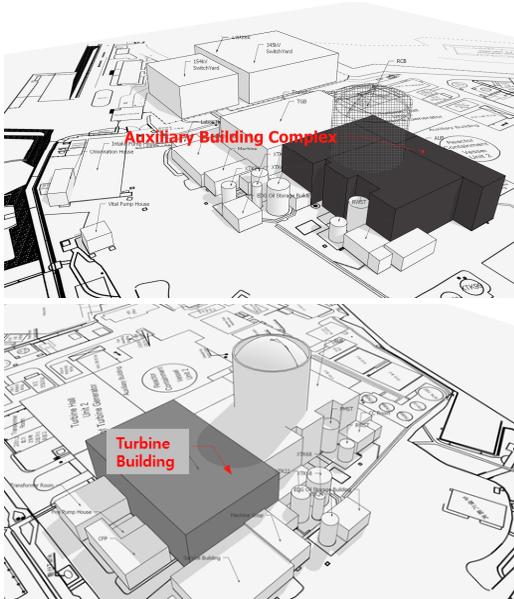
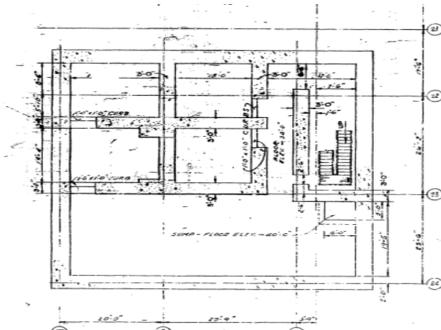
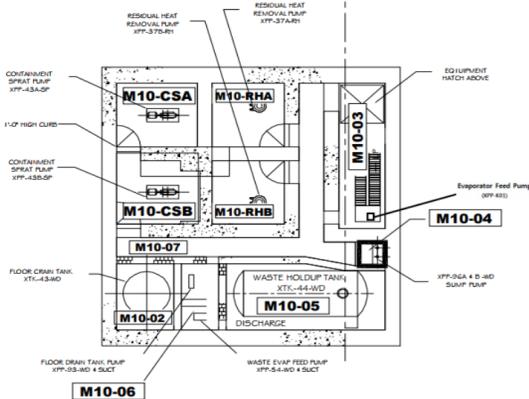


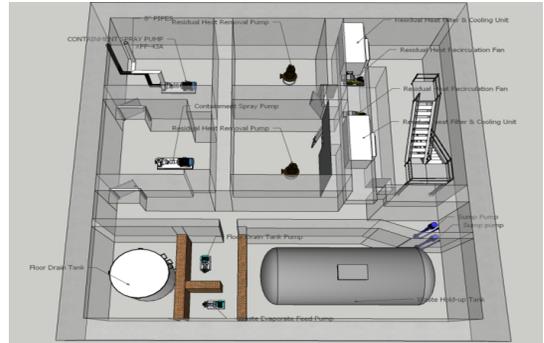
그림 6. 건물별 3차원 시각화 예시
Fig. 6. 3D visual-modeling of buildings



(a) 인쇄품질이 매우 불량한 도면
(a) Drawing with very poor print quality



(b) 2차원 도면의 전산화
(b) Digitization of a 2D drawing



(c) 디지털 전환을 통해 작성한 3차원 모델링
(c) 3D modeling created through digital transformation
그림 7. 구조물 · 계통 및 기기의 3차원 시각화 과정
Fig. 7. 3D visual-modeling process of SSCs

그림 7(a)는 인쇄품질이 불량한 구조 도면이다. 그림 7(b)는 인쇄품질이 불량한 구조 도면을 기초로 배관계장도 및 일반기기배치도에 명시되어 있는 주요 기기의 전산 도면을 구축하였다. 그림 7(c)는 2차원 전산 도면을 활용하여 3차원 시각화 자료를 구축하였다. 이와 같은 디지털 전환 방식으로 노후 원전에 대한 3차원 역설계를 수행하였다. 이는 기존 2차원 도면 전산화 과정에서 한 단계 진일보한 방법으로 기존 전통적인 방법에서 발견할 수 없던 해체제고량의 오차를 발견할 수 있다. 이렇게 확보한 3차원 시각화 자료를 활용하여 해체제고량의 오차를 다시 검증하였다. 그 검증 결과는 제4장에 정리하였다.

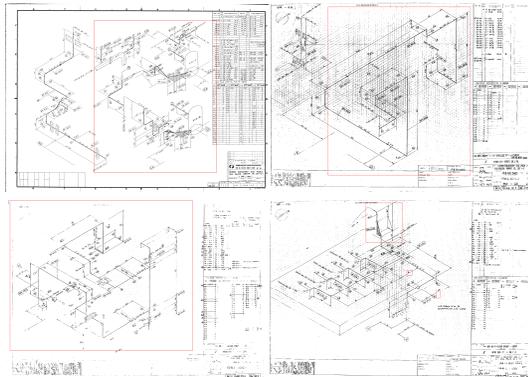
3차원 역설계 방법을 통해 구축한 3차원 시각화 자료는 해체제고량 평가뿐만 아니라 해체·철거공사 상세계획 수립의 기초 자료, 공사설계서 중 3차원 도면, 철거공사 현장에 익숙하지 않은 초보 작업자 사전교육 자료로도 활용할 수 있다. 최종적으로는 최종해체계획서 승인 이후 해체공사 시공계약자가 작성해야 하는 해체수행계획서 및 철거작업절차서 (Dismantling work procedure)의 기초 자료로도 활용할 수 있다.

3.2 기기 번호 미보유 설비의 3차원 역설계

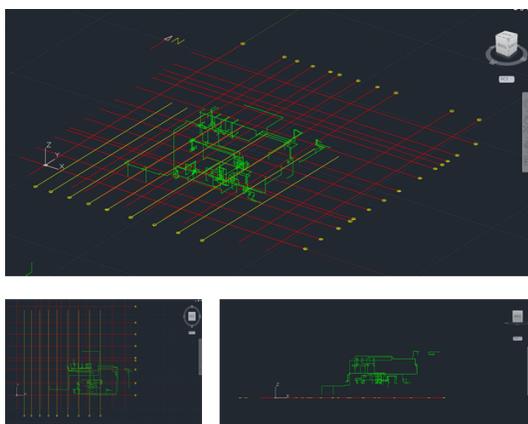
기기 번호가 없는 대표적인 벌크성 자재는 배관, 케이블, 케이블트레이 등이 있다. 벌크성 자재 중 배관에 대한 물량 평가로 전통적인 방식에 기반한 해체제고량을 적용하는 것은 많은 제약이 있다.

배관계장도에는 배관의 길이가 표시되어 있지 않으며, 배관등각투상도에 표시된 배관 길이는 인쇄 상태가 매우 불량하였다. 디지털 자료의 부재로 물량을 모두 수기로 기록하여 합산하였다.

상술한 문제를 해결하기 위하여 배관등각투상도의 배관에 대한 3차원 좌표값을 계산한 후 3차원 배관 배치도면을 구축하였다. 3차원 배관 배치도면 작성 시 각 계통별 동일 환경의 배관은 같은 레이어(Layer)로 분류하였다. 배관 환경으로 분류한 각각의 레이어만 활성화한 후 상용 프로그램(오토캐드)을 활용하여 배관 길이를 자동으로 계산하였다. 전통적인 방식에서 발생했던 설계자에 의한 수기 계산 오류 및 계산 결괏값을 물량표에 입력할 때 발생할 수 있는 인적 오류를 개선하였다.



(a) 2차원 piping isometric drawings
(a) 2D piping isometric drawings



(b) 3차원 piping isometric drawings
(b) 3D piping isometric drawings

그림 8. 2차원 배관등각투상도와 3차원 배관배치도
Fig. 8. 2D-based piping isometric drawings and 3D-based area piping drawings

그림 8은 이미지 기반의 배관등각투상도를 검토하여 3차원 좌표 기반의 배관배치도를 작성한 예시를 보여준다.

3.3 타 산업분야 디지털 전환 사례 연구

상기에서 살펴본 바와 같이 노후 원전 해체 산업 분야의 디지털 전환 수준은 매우 낮아 디지털 전환 방법론의 선행연구로 활용할 수 있는 충분한 연구 사례가 부족한 상황이다. 이에 원전 산업이 아닌 디지털 전환 수준이 높은 타 산업계의 선행연구를 검토하여 다른 시각으로 개선점을 도출하고자 한다.

스마트 건설 기술 발전과 더불어 건설 산업 내에서 설계 도면은 프로젝트의 핵심 정보를 담고 있는 만큼 체계적인 관리 시스템 구축이 절실하다. 하지만 기존에는 대부분의 도면이 단순 스캔 이미지 형태로 관리되어 정보 활용성이 저하되고, 이는 건설 프로세스 전반의 효율성을 감소시키는 주요 원인으로 지적되어 왔다. 최근에는 딥러닝 기반의 도면 디지털화 알고리즘 개발을 통해 이러한 문제를 해결하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 지속적인 알고리즘 유지보수를 위한 시스템 구축 선행 사례를 파악하였다[8]. 또한, 문화재 복원 및 디지털 전환 분야에서는 핸드헬드 스캐너와 사진측량 방식을 비교 분석하여, 사진측량 방식이 문화재의 복잡한 형태와 질감을 더욱 정확하게 표현할 수 있음을 확인하였고, 개발된 3D 모델 데이터를 활용하여 실시간 렌더링 기반의 가상 전시 시스템을 구축한 사례를 확인하였다[9].

문서 데이터의 정보화를 위해 문서의 생성·수집 단계에서부터 표준화된 메타데이터 기반의 문서 작성 및 DB화하여 문서의 의미나 관계를 자동으로 기계가 해석 가능한 문서의 범위를 확대하고 표준화함으로써 범용 문서 제작까지 적용할 수 있는 연구 사례가 있었다[10]. 상하수, 전력, 통신 등과 같은 시설을 수용하는 지하공동구 재난안전 관리를 위한 최적의 디지털 트윈 시스템 구축 방안으로 제시한 내용 중 디지털 트윈 성숙도에 따라 Gartner의 3단계 중 1단계로 3D visualization 모델을 ETRI 5단계 중 1단계로 형사모사(2D 또는 3D로 모델링되어 시각화된) 모델을 제시하고 있다[11].

상기에서 검토한 선행 연구사례를 검토하여 노후 원전 해체 산업에 적용할 수 있는 디지털 전환 방법론의 아이디어를 도출하였다.

IV. 디지털 전환 기반 해체재고량 평가

4.1 해체재고량 평가 결과

제3장에서 제안한 디지털 전환 방식에 기반하여 주증기계통의 배관 물량평가에 관한 결과를 표 2에 정리하였다. 배관 물량 오차는 2차원 기반의 전통적인 방식과 디지털 전환 방식과의 차를 다음 식을 통하여 산정하였다.

$$error\ rate = \frac{2D - DT\ Method}{DT\ Method} \times 100 \quad (1)$$

표 2. 디지털 전환 방식에 의한 재고량 평가 결과
Table 2. Inventory evaluation results by digital transformation method

System / Pipe diameter	Data	Conventional (ft)	3 rd party validation (ft)	Digital tran. (ft)	error rate (%)
Main steam/28 inches (MS-PI-1)		97.7	97.7	97.9	(+0.2)
Main steam/28 inches (MS-PI-2)		110.7	110.7	110.7	0.0
Main steam/28 inches (MS-PI-3)		239.2	262.5	260.5	(-0.8)
Main steam/28 inches (MS-PI-4)		68.8	89.7	88.5	(-1.4)
Main steam/28 inches (MS-PI-11/12/16/17/18)		531.8	514.9	520.7	(+1.1)
Main steam/20 inches (MS-PI-13/14/15)		175.8	183.9	183.9	0.0
Main steam/20 inches (MS-PI-19/20/21)		175.8	183.9	183.9	0.0
Main steam/20 inches (N/A)		0	34.2	34.2	0.0
Main steam/4 inches (MS-PI-37)		27.6	27.6	27.6	0.0
Main steam/6 inches (MS-PI-38)		105.7	111.2	113.5	(+2.0)
Main steam/6 inches (MS-PI-45)		122.9	122.9	122.9	0.0
Main steam/6 inches (MS-PI-46) (Dia. error)		67.9	57.4	57.2	(-0.3)
Main steam/4 inches (MS-PI-128A/B)		0	11.2	11.2	0.0

전문가를 통한 제삼자 검증방식과 디지털 전환 방식의 3차원 기반 역설계를 통한 배관 길이의 오차 범위는 +2.0 % ~ -1.4 % 수준이었다. 따라서 3차원 역설계를 디지털 전환 방식을 활용한 해체재고량 평가의 유효성은 매우 높다.

4.2 비용-편익 분석

2차원 도면 기반한 전통적인 예비물량표 대비 다 경험 설계자에 의한 제삼자 검증방식의 해체재고량도 매우 정확하였다. 전통적인 방식과 3차원 역설계 방식의 정확도가 확인되었으므로 각각의 방식별 비용-편익 분석을 시행하였다. 전통적인 방식의 제삼자 검증 업무에 투입된 시간은 특급기술자 27 Man-hours이며, 3차원 배관 배치도면 작성에 투입된 시간은 중급숙련기술자 64 Man-hours이다. 2024년 1월 1일 기준 엔지니어링 원자력 기술 부분의 8시간 기준 노임단가는 특급기술자 450,681원, 중급숙련기술자 319,831원으로 시간당 단가는 각각 56,335원, 39,979원이다. 두 가지 방법에 대한 직접 투입 비용을 정리하여 표 3에 표시하였다.

표 3. 투입 비용 평가
Table 3. Evaluation of input costs

	Cost estimation	Cost (KRW)
Conventional method	27 x 56,335	1,521,045
Digital transformation method	64 x 39,979	2,555,656

실제 투입되는 설계자의 기술 등급에 따른 투입 시간과 비용의 편차는 배제한다. 표 3의 결과를 정리하면 해체재고량 평가에 대한 디지털 전환 방식은 전통적인 방식 대비 2.4배의 시간이 더 투입되어 비용은 약 1.7배 더 많이 소요되었다. 해체재고량 평가가 단 1회로 종료된다면 전통적인 방식이 디지털 전환 방식 대비 경제적으로 이점이 있다. 하지만 원전 해체의 특성상 해체재고량 평가는 여러 차례 변경이 발생할 가능성이 매우 크다. 전통적인 방식으로 작성한 해체재고량은 개정 시 특급기술자와 동일 수준의 기술자가 투입되어 그 수정을 진행하여야 하지만, 3차원 배관 배치도면은 중급기술자 이상만 투입되어도 해체재고량 수정이 가능하다.

4.3 해체재고량 개정 편익

해외 원전의 영구정지 이후의 해체 활동보고서 (Post-shutdown decommissioning activities report)에 따르면 실제 해체공사 수행 단계에서는 수많은 변경 사항이 발생하게 된다[12]. 실제 철거를 수행하기 이전에는 파악이 불가능 지하 매립 배관이 도면과 다른 위치에서 발견되기도 하고, 예상치 못한 방사성 물질의 누출로 인한 콘크리트 내부의 오염 등의 추가로 발견된 사례가 있다[13][14]. 이런 예상치 못한 상황에 발생할 때마다 해체재고량의 개정이 필요하다. 해체재고량의 개정은 제2장에서 설명한 절차에 따라 물량평가를 다시 수행하여야 한다. 해체재고량 개정에 따른 전통적인 방식의 투입 비용은 최초 수행 단계와 유사한 비용이 필요하다. 그에 반하여 3차원 배관 배치도면에 기반한 해체재고량의 수정은 짧은 시간에 수행할 수 있다. 해체 수행 과정에서 변경이 1차례만 발생해도 디지털 전환 방식의 경제성이 전통적인 방식보다 우위를 점할 수 있다. 실제 해체공사 수행 중에 해체재고량의 개정이 필요할 때 설계변경 완료 시까지 공사 중지가 발생할 수도 있다. 공사 중지 기간에 발생하는 비용은 해체재고량 개정에 필요한 엔지니어링 직접 인건비와는 비교할 수 없을 수준의 부차적인 비용이 발생하게 된다. 결론적으로 해체 수행 단계에서 변경을 반드시 발생한다고 간주한다면 디지털 전환 방식을 통한 해체재고량 평가 방식이 비용-편익 측면에서 더 우수함을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 과제

노후 원전은 필연적으로 영구정지되며 이후 원자력안전법의 관리 대상에서 배제하기 위한 해체 활동을 수행하여야 한다. 본 논문에서는 전통적인 방식으로 산정한 해체재고량의 문제점을 개선하기 위한 3차원 역설계를 통한 디지털 전환 방식의 물량평가 방식을 제안하였다.

해체재고량의 효과성 입증 방식으로 다 경험 설계자에 의한 제삼자 검증방식과 디지털 전환 기법을 비교 분석하였다. 디지털 전환 기법을 활용한 물량평가 방식이 전통적인 방식 대비 오차가 감소함

을 확인하였다.

본 논문에서는 국내 최초로 수행하는 원전 최종 해체계획서 작성의 필수 입력 자료인 해체재고량 산정에 디지털 전환 방식의 효과성을 입증하였다는 점에서 연구에 의의를 찾을 수 있다. 그러나 이번 연구에서 제안한 디지털 전환 방식의 한계점도 도출되었다. 해체재고량 산정의 기초 자료로 활용하고 있는 설계 도서가 본질적으로 내포하고 있는 정보 오류는 판별할 수 없다는 한계가 도출되었다[15]. 후속 연구는 발전소에서 관리하는 최종 도면과 실제 발전소 현장에 설치된 구조물·계통 및 기기의 차이까지 판별할 수 있는 3D Scan-to-BIM 연계 연구를 제안한다. 3차원 스캐너를 통해 측정된 구조물·계통 및 기기의 점군 자료(Point cloud data)는 수십 년에 걸쳐 시행한 유지보수 및 설계변경이 모두 반영된 실제 현장 배치 여건을 정확하게 파악할 수 있을 것으로 기대한다. 새롭게 제안하는 디지털 전환 방법은 노후 원전에서 관리하는 최신 자료와 실제 현장의 차이점까지 식별할 수 있으므로, 해체재고량 평가에서 발생 가능한 오류를 사전에 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 현 연구의 한계점을 극복하기 위한 3D Scan-to-BIM의 유효성에 대한 후속 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] Nuclear Safety and Security Commission, "Regulations on the Preparation of Decommissioning Plans for Nuclear Reactor Facilities, Etc.", Oct. 2021.
- [2] R. H. Helle and H. G. Lemu, "A Case Study on Use of 3D Scanning for Reverse Engineering and Quality Control", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, No. 6, pp. 5255-5262, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>.
- [3] McKinsey & Company, "Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity", McKinsey Global Institute, Feb. 2017.
- [4] Nuclear Safety and Security Commission, "Regulations on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities, Etc.", No. 30, Aug. 2021.

[5] I. S. Jung and J. S. Won, "Plan of BIM-based Quantity Take-off for Nuclear Power Plant Decommissioning", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 9, pp. 6297-6304, Sep. 2015. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.6297>.

[6] J. Kim and N. Kim, "The Status and Development Direction of Construction CALS", Proceedings of Korean Institute of Information Technology Conference, Busan, Korea, pp. 1-5, May 2012.

[7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Basic Guidelines for BIM in the Construction Industry", Dec. 2020.

[8] C. H. Cho, C. H. Ko, A. R. Oh, D. U. Hong, and J. M. Hwa, "MLOps System for the Continuous Digitalization of Construction Drawings", Journal of KIIT, Vol. 21, No. 12, pp. 23-33, Dec. 2023. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.12.23>.

[9] S. Y. Kim, "Research on the 3D Object Digitalization Method of Korean Heritage Overseas", Journal of KIIT. Vol. 21, No. 10, pp. 11-19, Oct. 2023. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.10.11>.

[10] H. D. Heo, D. K. Kang, Y. S. Kim, and S. H. Chun, "A Study on the Intelligent Document Processing Platform for Document Data Informatization", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 24, No. 1, pp. 89-95, Feb. 2024. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2024.24.1.89>.

[11] K. S. Chung and W. S. Jung, "A Study on the Dataset Structure of Digital Twin for Disaster and Safety Management", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 23, No. 5, pp. 89-95, Oct. 2023. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2023.23.5.89>.

[12] U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Status of the Decommissioning Program - 2021 Annual Report", Dec. 2021.

[13] Electric Power Research Institutes (EPRI), "Jose

Cabrera Nuclear Power Plant Decommissioning Experience: Detailed Experiences 2006 to 2022", Jun. 2023.

[14] Electric Power Research Institutes (EPRI), "San Onofre Nuclear Generating Station - Unit 1 Decommissioning Experience Report", Detailed Experiences 1999 - 2008, Dec. 2008.

[15] J. S. Seo, "Prerequisites for BIM Implementation to Succeed at Digital Transformation", Review of Architecture and Building Science, Vol. 64, No. 9, pp. 44-49, Aug. 2020.

저자소개

김 유 수 (Yoo-Soo Kim)



2003년 2월 : 한양대학교 공과대학
기계공학과(공학사)
2020년 2월 : 충북대학교
산업대학원
글로벌건설엔지니어링(공학석사)
2022년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교

디지털융합공학과 박사과정

2003년 3월 ~ 2006년 3월 : SK Teletech 선임연구원
2006년 12월 ~ 현재 : 한국전력기술(주) 원자력사업본부
사후관리사업처 사업부책임자

관심분야 : 원전해체, 사용후핵연료 건식저장, 인공지능,
디지털변환

이 해 연 (Hae-Yeoun Lee)



1997년 2월 : 성균관대학교
정보공학과(학사)
1999년 2월 : KAIST 전산학과
(공학석사)
2006년 2월 : KAIST
전자전산학과(공학박사)
2008년 3월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 교수
관심분야 : Digital Forensics, Image Processing, IoT